

KALY JAKO SUROVINA K ENERGETICKÉMU VYUŽITÍ

SLUDGE AS A RAW MATERIAL FOR ENERGY RECOVERY

Obsah

Obsah.....	1
1. Úvod	3
2. Odpadní vody vznikající v důsledku různých lidských činností.....	5
2.1 Průmyslové odpadní vody	5
2.1.1 Odpadní vody ze zpracování ropy	6
2.1.2 Odpadní vody z chemického průmyslu	7
2.1.3 Odpadní vody z výroby buničiny a papíru	7
2.1.4 Odpadní vody z těžby a tepelného zpracování uhlí.....	8
2.1.5 Odpadní vody z povrchové úpravy kovů.....	9
2.1.6 Odpadní vody z tepelných elektráren	9
2.1.7 Odpadní vody z textilního průmyslu	10
2.1.8 Odpadní vody z potravinářského průmyslu.....	10
3. Zjednodušený popis ČOV.....	11
3.1 Mechanické čištění	11
3.1.1 Hlavní nátokový objekt	12
3.1.2 Hrubé předčištění.....	12
3.1.3 Usazovací nádrže	13
3.2 Biologické čištění	13
3.2.1 Aktivační nádrže.....	14
3.2.2 Dosazovací nádrže	14
3.3 Kalové a plynové hospodářství – zpracování kalů	14
3.3.1 Zahušťování kalu	14
3.3.2 Vyhnívací nádrže – stabilizace a hygienizace	16
3.3.3 Uskladňovací nádrž	19
3.3.4 Odvodnění kalu	20
3.3.5 Sušení kalu.....	21
3.3.6 Plynojemy	23
3.3.7 Kogenerační jednotky	23
4 Kaly z ČOV.....	24
4.1 Složení kalů	24
4.2 Vlastnosti kalů	25
4.2.1 Fyzikální vlastnosti kalů	26
4.2.2 Biologické vlastnosti kalů	29
4.3 Legislativa nakládání s kaly	29
4.4 Způsoby nakládání s kaly	30
5 Papírenské kaly.....	33

5.1	Výrobní postup v Biocelu Paskov a.s.....	33
5.2	Vznikající kaly	35
5.3	Experimentální činnost.....	36
6	<i>Zemědělské kaly – výpalky</i>	41
6.1	Lihovarnické výpalky	41
6.2	Experimentální činnost.....	43
6.3	Ekonomický přínos	48
7	<i>Závěr</i>	49
	<i>Seznam použité literatury</i>	51
	<i>Seznam obrázků</i>	54
	<i>Seznam tabulek</i>	55
	<i>Seznam grafů</i>	56
	<i>Seznam použitých zkratk</i>	57

1. Úvod

V důsledku veškerých lidských činností vznikají odpady v plynném, kapalném i pevném skupenství, které představují nežádoucí produkty. Mezi tuhými a kapalnými odpady jsou mezičlánkem odpadní kaly, skládající se z tuhého a kapalného podílu [1].

Nevyhnutelný odpad při čištění odpadních vod je kal. Na čistírnu odpadních vod přitéká odpadní voda, která je během procesu čištěna a na odtoku z čistírny odpadních vod je obsah znečišťujících látek významně snížen. Ve vodě obsažené nežádoucí složky se koncentrují do objemově nevýznamného vedlejšího proudu – kalu. Přebytečná biomasa z biologického čištění může být součástí kalu.

Při čištění odpadních vod dochází v mechanickém stupni k odstraňování hrubých nečistot, které jsou separovány jako shrabky nebo usaditelné nerozpuštěné látky zachycené v lapáku písku. Biologicky odbouratelné látky jsou dále redukovány v biologickém stupni čištění. Takto odstraněné látky jsou poté kumulovány v tzv. čistírenských kalech. Kal představuje směs vody a pevných látek oddělenou z odpadní vody na základě různých způsobů. V kalech je koncentrováno 50 – 80 % z původního znečištění a tvoří cca čtvrtinu objemu čištěných odpadních vod. Pojmem surový kal bývá označen kal, který ještě nebyl stabilizován. Podle toho, odkud je kal ze systému odebírán, rozlišujeme:

- Primární kal
- Sekundární kal (přebytečný kal)
- Terciární kal (z chemického srážení).

Ze surové odpadní vody se v usazovacích nádržích nebo jiných separačních zařízeních separuje primární kal, který je převážně biologické povahy. Složení tohoto kalu závisí především na složení přitékající odpadní vody a poměry ve stokové síti.

Z biologického stupně čištění se v dosazovací nádrži odděluje sekundární kal, který bývá častěji označován jako přebytečný aktivovaný kal. Sekundární kal obsahuje přebytečnou biomasu a nerozložené zbytky organických látek. Jeho složení závisí nejen na složení surové vody, ale také na technologii čištění.

Primární a sekundární kal se od sebe liší složením i vlastnostmi a mohou být dále zpracovávány odděleně nebo společně. Výhodné použití odděleného zpracování je v případě možnosti využití kalu pouze z jednoho stupně čištění.

Hlavním cílem úpravy kalů je zamezit nepříznivým dopadům na životní prostředí a lidské zdraví. Počáteční kvalita odpadní vody a úroveň požadované technologie zaručí dosažení kvalitativních požadavků na vyčištěnou odpadní vodu a závisí na nich koncentrace prospěšných i znečišťujících látek v kalu.

Využití nebo zpracování kalů má být přijatelné pro životní prostředí, udržitelné a ekonomicky únosné. Náklady na zpracování kalů činí obvykle více než polovinu celkových nákladů na čištění odpadních vod [2].

Cílem mé diplomové práce bylo zrealizovat jednoduché technické zařízení pro úpravu kalu na jejich energetické využití tak, aby bylo cenově dostupné malým provozovatelům.

2. Odpadní vody vznikající v důsledku různých lidských činností

Na základě lidských činností dochází ke změnám přirozené jakosti vod, kdy se znečišťují a vznikají vody odpadní [3]. Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách, definuje v §38 odpadní vody jako „vody použité v obytných, průmyslových, zemědělských, zdravotnických a jiných stavbách, zařízeních nebo dopravních prostředcích, pokud mají po použití změněnou jakost (složení nebo teplotu), jakož i jiné vody z nich odtékající, pokud mohou ohrozit jakost povrchových nebo podzemních vod“ [4].

Odpadní vody se podle původu rozdělují na [3]:

- splaškové (odpadní vody z domácností, sociálních zařízení, kuchyní),
- městské (směs odpadních vod průmyslových, splaškových a srážkových),
- průmyslové (znečištěné vody z výrobních procesů v průmyslu),
- zemědělské (znečištěné vody ze zemědělské velkovýroby),
- srážkové (vody, odváděné do stokové sítě)

2.1 Průmyslové odpadní vody

Průmyslové odpadní vody těžbě anorganických a organických surovin a při jejich následném zpracování nebo při výrobě v průmyslových závodech. Podle toho v jakém průmyslovém odvětví vznikají, se tyto vody liší svým složením, charakterem znečištění a fyzikálními vlastnostmi. Průmyslové odpadní vody mohou být převážně anorganicky, převážně organicky znečištěné nebo přechodné, které jsou nejčastější. Toto rozdělení je na základě znečišťujících látek obsažených v průmyslových odpadních vodách. Následně se také hodnotí přítomnost toxických a různých škodlivých látek.

Převážně anorganicky znečištěné odpadní vody obsahují znečišťující látky v rozpuštěné nebo nerozpuštěné formě a může se jednat o látky toxické nebo netoxické [5].

Převážně organické znečištění odpadních vod je způsobováno chemickými sloučeninami, které na základě jejich povahy můžeme rozdělit na:

- netoxické a biologicky rozložitelné (např. sacharidy, proteiny, glycerol),

- netoxické a biologicky obtížně rozložitelné (např. organická barviva, alifatické sloučeniny, ligninsulfonany),
- toxické a biologicky rozložitelné (např. organofosforové insekticidy, fenoly, chlorfenoly),
- toxické a biologicky obtížně rozložitelné (např. chlorované uhlovodíky, kationaktivní tenzidy, dinitrofenoly).

Podle druhu obsažených anorganických a organických látek lze průmyslové odpadní vody rozdělit do třech základních skupin [3]:

- převážně anorganicky znečištěné odpadní vody nerozpuštěnými látkami (z keramického a sklářského průmyslu, z praní uhlí a rud apod.),
- převážně anorganicky znečištěné odpadní vody netoxickými rozpuštěnými látkami (výroba hnojiv draselných, dusíkatých a fosforečných, výroba sody),
- převážně anorganicky znečištěné odpadní vody nerozpuštěnými nebo rozpuštěnými látkami, z nichž některé mohou být toxické (důlní vody, radioaktivní odpadní vody, vody z povrchové úpravy kovů).

Průmyslové odpadní vody kromě těchto látek mohou obsahovat mikrobiologické znečištění nebo mohou být tepelně znečištěny [5].

2.1.1 Odpadní vody ze zpracování ropy

Při zpracování ropy dochází ke vzniku velkého objemu odpadních vod s různým stupněm znečištění a různým charakterem znečišťujících látek. Tyto odpadní vody jsou tvořeny vodami chladicími, které tvoří největší podíl, dále vodami technologickými, srážkovými a splaškovými ze sociálních zařízení a některé další [3].

Znečišťující látky, které jsou obsažené v odpadních vodách, mohou být ve formě rozpuštěné, ve spojitě fázi nebo v emulzi. Odpadní vody z odvodňování a odsolování ropy a některých syntetických pochodů jsou tvořeny stabilními ropnými emulzemi. Velká množství sulfidů a dalších sloučenin síry mají odpadní vody z hydrogenace.

Většinu odpadních vod ze zpracování ropy je potřeba čistit a z důvodu dosažení optimálních nákladů a maximálně možného vyčištění se musí separovat. Volba vhodné

čistící technologie závisí na druhu znečištění vod. Čistící proces je tvořen několika stupni, kdy nejdříve dojde k mechanickému oddělení volných ropných látek v separátorech, dále dochází k číření odpadních vod a to z důvodu odstranění emulzí a v posledním stupni probíhá biologické čištění většinou aktivací s dlouhou dobou zdržení.

2.1.2 Odpadní vody z chemického průmyslu

Odpadní vody z chemického průmyslu patří mezi nejobtížněji čistitelné vody, a to z důvodu jejich velmi proměnlivého složení. Jsou rozdělovány na:

- odpadní vody z anorganických výrob (obsahující nerozpuštěné anorganické látky, kyseliny, rozpuštěné soli, těžké kovy apod.),
- odpadní vody z organických výrob (obsahující anorganické látky-kyseliny, soli, těžké kovy a různé organické látky).

Technologické odpadní vody se před smícháním s ostatními vodami předčišťují. Předčišťování se provádí několika způsoby:

- usazování, filtrace;
- číření, flotace;
- neutralizace, oxidace, redukce;
- adsorpce apod.

Odpadní vody se po předčištění odvádějí na biologickou čistírnu odpadních vod. Biologické čištění zde probíhá prostřednictvím aktivace, kdy v případě organického znečištění se používá aktivace s dlouhou dobou zdržení [5].

2.1.3 Odpadní vody z výroby buničiny a papíru

Výroba buničiny a papíru se řadí mezi největší znečišťovatele povrchových vod na základě množství produkováných odpadních vod i jejich obsahu anorganických a organických látek. Výroba celulózy může probíhat dvěma způsoby [3]:

1. Sulfitovým způsobem – v kyselém prostředí za použití hydrogensířičitanů;
2. Sulfátovým způsobem – v alkalickém prostředí prostřednictvím NaOH a Na₂S.

Odpadní vody tvoří tyto druhy vod [3]:

- z přípravy varné kyseliny (obsahující anorganické soli a oxid siřičitý),
- ze zpracování dřeva (obsahující mechanickou nečistotu),
- kondenzáty od plynů z vařáků (obsahující oxid siřičitý a řadu organických látek, přičemž mnohé z nich jsou páchnoucí),
- vody prací,
- z třídění a odvodňování buničiny – vlákna,
- z bělení (obsahující sloučeniny chloru, oxidační produkty, vlákna), i když v dnešní době dochází k jejich výraznému snižování.

Při výrobě celulózy sulfitovým způsobem dochází ke vzniku odpadní vody při praní, separaci a odvodnění buničiny. Tyto odpadní vody mimo jiné obsahují obtížně rozložitelné organické látky způsobující tmavě hnědé zabarvení vody (ligninsulfonany). Čištění těchto vod vyžaduje několikastupňový proces, který zahrnuje řadu různých mechanických, chemických a biologických operací. Posledním krokem tohoto čistícího procesu bývá odstranění silného zabarvení vody.

Naopak při výrobě celulózy sulfátovým způsobem vznikají odpadní vody při praní, separaci a odvodnění buničiny, dále při kondenzaci vařákových plynů a při bělení celulózy. Tyto odpadní vody vykazují tmavě hnědé zabarvení a alkalickou reakci. Obsahují méně organických látek, které jsou především biologicky rozložitelné v porovnání s odpadními vodami z výroby celulózy sulfitovým způsobem. K čištění těchto odpadních vod se používají mechanicko – biologické čistírny. Zachycování vláken se provádí v mechanickém stupni, který se skládá ze sedimentace nebo flotace. Pro biologický stupeň čištění odpadních vod je využívána aktivace.

Odpadní vody z výroby buničiny a papíru obsahují především krátká vlákna buničiny, plnidla a klíždla, která se oddělují prostřednictvím sedimentace, flotace či filtrace [5].

2.1.4 Odpadní vody z těžby a tepelného zpracování uhlí

V rámci tohoto průmyslu dochází k produkci vod z uhelného prádla. Tyto odpadní vody obsahují jemnou suspenzi částic uhlí. Před vypouštěním odpadních vod musí dojít

k jejich vyčištění prostřednictvím sedimentace v odkalištích a vzniklé kaly je nutno odvodnit [3].

Při zplyňování hnědého uhlí a výrobě koksu dochází především ke vzniku fenolových vod. Fenolové vody bývají znečištěny řadou toxických a zapáchajících chemických sloučenin, které jsou v některých případech ve vysokých koncentracích. Jedná se o různé druhy fenolů, amoniak, dehty, sirné sloučeniny, organické látky. Tyto vody obsahují také nerozpuštěné látky – částice uhlí, hlušiny apod. Čistící postupy těchto vod vycházejí z extrakce a dalších mechanických metod. Nejprve dochází při čištění těchto vod k odstranění dehtu, poté amoniaku a nakonec fenolových sloučenin. Konečným stupněm v tomto případě bývá biologický stupeň ve formě několikastupňové aktivace s nitrifikací a denitrifikací [5].

2.1.5 Odpadní vody z povrchové úpravy kovů

Konečná povrchová úprava kovů se provádí prostřednictvím galvanování. Odpadní vody z tohoto procesu obsahují toxické anorganické soli těžkých kovů, případně dusitanové a kyanidové aniony. Rozlišujeme odpadní vody z moření a chromové odpadní vody, které mají kyselou povahu a kyanidové vody, které mají naopak povahu alkalickou. Jejich odstranění je naprosto nutné, a to z toho důvodu, že již při malých množstvích ovlivňují aerobní i anaerobní stupeň čištění a provádí se chemickými metodami.

Čistírenské procesy, které se nejčastěji používají, jsou [5]:

- sedimentace a filtrace;
- neutralizace, srážení, oxidace, redukce;
- iontová výměna.

2.1.6 Odpadní vody z tepelných elektráren

Největší negativní vliv vykazují chladicí vody, které jsou teplé. Jejich přímé vypouštění do vodních toků by způsobovalo oteplování vodních toků, čímž by docházelo ke snižování rozpustnosti kyslíku, intenzivnímu růstu nežádoucích organismů, urychlování rozkladných pochodů apod. Z tohoto důvodu je snaha o maximální podíl recirkulace.

Při provozu tepelné elektrárny dochází ke vzniku dalších odpadních vod, jako jsou vody z cirkulačního a chladicího systému, vody z různých metod úpravy (filtrace, čiření, ionexů apod.) a také z čištění energetických zařízení, odpadní vody ze strojoven a vody splaškové. Čištění těchto vod se provádí standardními metodami [3].

2.1.7 Odpadní vody z textilního průmyslu

V textilním průmyslu vznikají odpadní vody v rámci mokrých postupů zpracování vláken a tkanin. Jedná se o mokré postupy, jako jsou praní, vyvářka, bělení, barvení a apretace (konečná úprava textilií). Odpadní vody z praní obsahují tensidy, zbytky alkálií a pracích prostředků (polyfosforečnany). Odpadní vody z barvení textilií mohou vedle anorganických a organických zbytků barviv obsahovat také soli, alkálie, sulfidy apod.

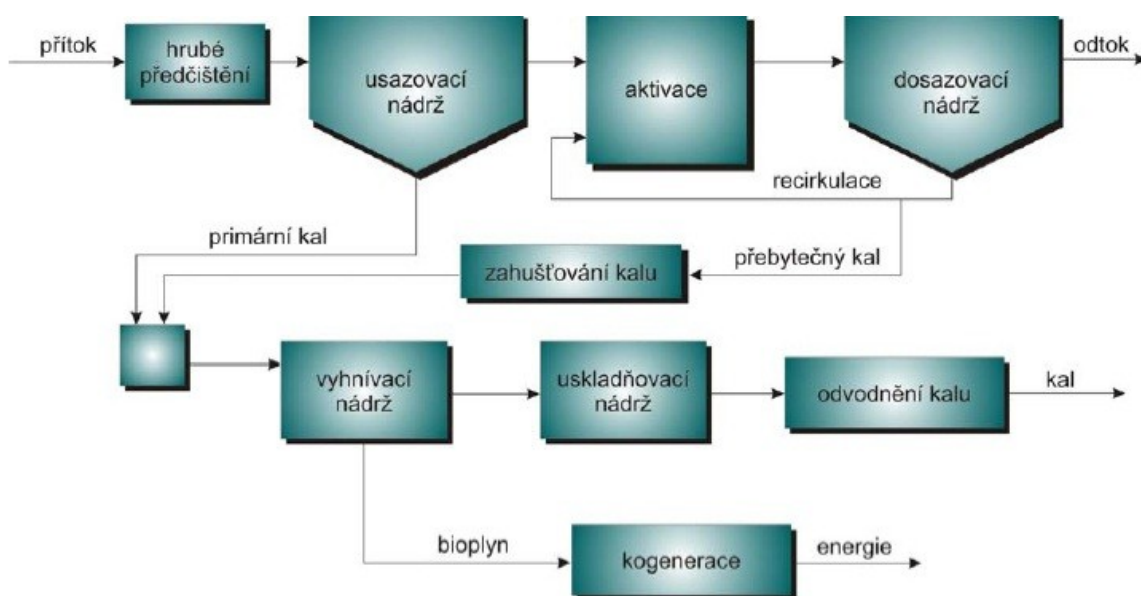
Znečištění odpadních vod vznikajících při výrobě textilu je silně organické i anorganické. Tyto odpadní vody jsou barevné. Čistící proces těchto odpadních vod je tvořen několika stupni. Nejčastěji se skládá ze stupně mechanického a biologického. Posledním stupněm čištění je dočištění prostřednictvím filtrace přes aktivní uhlí. Filtrací dojde k odstranění biologicky nerozložitelných a barevných látek.

2.1.8 Odpadní vody z potravinářského průmyslu

Povaha vypouštěných odpadních vod je dána technologií výroby a zpracovávanou surovinou. Tyto vody obsahují z velké části především biologicky rozložitelné organické znečištění a nerozpuštěné anorganické a organické látky. Čištění těchto odpadních vod probíhá ve dvou stupních. V prvním stupni dojde k zachycení nerozpuštěných látek nebo organických koncentrátů (tuky, krev, syrovátka apod.) a v druhém stupni podléhají vody biologickému čištění. Biologické čištění se provádí prostřednictvím nízkozáťažové aktivace s dlouhou dobou zdržení a aerobní stabilizací kalu nebo se v poslední době používá anaerobní způsob biologického čištění, který může být kombinovaný s aerobním dočištěním [5].

3. Zjednodušený popis ČOV

Čištění odpadních vod se provádí v zařízeních, které se označují jako čistírny odpadních vod. Čistírny odpadních vod se vyskytují v blízkosti různých provozů, kde slouží k čištění průmyslových vod, odpadních vod ze zemědělské výroby. Dále se s nimi setkáváme u měst a obcí, kde jsou využívány k čištění vod komunálních a smíšených (komunální vody s průmyslovými). Čistírny odpadních vod mohou existovat v podobě mnoha typů. Jejich rozdělení se provádí hlavně podle velikosti a typu čistírenského procesu. Při čištění odpadních vod se nejčastěji používají mechanické, biologické a chemické procesy [6]. Při procesech čištění odpadních vod dochází ke vzniku velkého množství kalu, které běžně obsahuje více než 90 % vody [7]. Zjednodušené technologické schéma ČOV je znázorněno na **Obrázku 1** [8].



Obrázek 1 Zjednodušené technologické schéma ČOV [8]

3.1 Mechanické čištění

Při mechanické čištění dochází k odstranění nerozpuštěných látek, které tvoří podstatnou část znečištění odpadních vod. Mezi mechanické procesy, které se nejčastěji používají, patří usazování a zahušťování suspenzí. K usazování dochází při hrubém předčištění odpadních vod, v lapácích písku, v usazovacích, resp. dosazovacích nádržích, kde současně probíhá i zahušťování suspenzí.

3.1.1 Hlavní nátokový objekt

Hlavní nátokový objekt, do kterého přitéká odpadní voda, se skládá z hlavní stavidlové komory regulující přítok do ČOV a odlehčovací komory s hrubým předčištěním dešťových vod.

Dešťová zdrž je odlehčovací objekt, který se používá k zachycení přívalových dešťů, čímž má zamezit velkému přítoku do ČOV. Odpadní voda z dešťové zdrže je přečerpávána prostřednictvím čerpací stanice na proces hrubého předčištění.

3.1.2 Hrubé předčištění

Hrubé předčištění, které je také označováno jako ochranná část čistírny, je odstranění velkých plovoucích nebo vodou sunutých předmětů. Těmito látkami by mohlo dojít k narušení pracovních procesů vlastního čištění odpadních vod, ale především by tyto látky mohly způsobit nežádoucí poruchy strojního zařízení. Zařízení používaná k hrubému předčištění jsou lapáky šterku, česle a lapáky písku [6].

Lapák šterku

Lapák šterku je jímka nacházející se těsně před čistírnou na přiváděči odpadních vod. V lapácích šterku dochází k zachycení velkých a těžkých předmětů, a to zejména v období přívalových dešťů. K zachycení těžkých předmětů dochází rozšířením průtočného průměru a snížením dna v lapáku šterku, čímž je čistírna chráněna od úlomků cihel, šterku nebo kamenů. Odstranění takto zachycených předmětů se provádí ručně nebo strojně pomocí drapáku [9].

Česle

Česle jsou určeny k zachycování větších předmětů (větve, shluky trávy, hadry, obaly) a hrubých nerozpuštěných částic (větší zbytky ovoce, zeleniny, papíry, korkové zátky, cigaretové filtry apod.). Je to mříž umístěna v přítokovém žlabu za lapákem šterku většinou pod úhlem 30° až 60°. Tato mříž je tvořena rámem a řadou ocelových prutů (česlic) kruhového, obdélníkového či lichoběžníkového profilu, skloněnými ve směru toku [10]. Česle jsou podle šířky průlin děleny na hrubé, polohrubé a jemné [6]:

- Hrubé česle – šířka průlin 80 – 100 mm
- Polohrubé česle – šířka průlin 10 – 25 mm

- Jemné česle – šířka průlin do 10 mm.

Shrabky (zachycené nečistoty), které se hromadí mezi česlicemi, jsou odstraňovány z česlí strojním či ručním stíráním pomocí hrabel [10].

Lapák písku

V lapácích písku dochází k odstranění suspendované, těžké anorganické látky jako písek, úlomky skla, jemná škvára apod. Jeho úkolem je oddělit tyto látky od ostatních nerozpuštěných látek organického původu, které se odstraňují v sedimentačních nádržích. Lapáky písku pracují na principu snížení průtočné rychlosti vody [10]. Využívají gravitační sílu a rozdíl hustot. U většiny lapáků písku se používá průtočná rychlost $0,3 \text{ m.s}^{-1}$, čímž je zajištěno usazování písku do průměru zrna $0,2 \text{ mm}$ [11]. Odstraněním písku dochází k zamezení jeho usazování na nežádoucích místech a snížení abraze případných následujících zařízení. Lapák bývá často v kombinaci s lapákem tuků. Jsou to většinou pravoúhlé nebo kruhové nádrže, které jsou vybaveny zařízením na stírání dna i hladiny [6].

3.1.3 Usazovací nádrže

Usazování jemných nerozpuštěných látek probíhá v usazovacích nádržích, kde také dochází ke stírání plovoucích nečistot z povrchu nádrže. Při tomto procesu vzniká kal, který bývá označován jako primární a je energeticky cennou surovinou. Usazovací nádrže jsou pravoúhlé nebo kruhové, které mají buď horizontální, nebo vertikální průtok [11].

3.2 *Biologické čištění*

Biologické čištění odpadních vod probíhá prostřednictvím biologických procesů za působení aerobních mikroorganismů. Rozklad organických látek ve vodě oxidačními procesy je umožňován mikroorganismy. Oxid uhličitý a voda představují výsledný produkt biologického čištění. Biologický stupeň čištění probíhá v aktivačních nádržích. U dosazovacích nádrží je pak oddělen tzv. aktivovaný kal (zbytky mikroorganismů) od vyčištěné vody.

3.2.1 Aktivační nádrže

Aktivace je jedním z nejrozšířenějších způsobů biologického čištění městských i průmyslových odpadních vod v aerobních podmínkách. Do aktivační nádrže je přiváděna aktivační směs. Aktivační směs vzniká směřováním odpadní vody s vratným aktivovaným kalem za dostatečného provzdušňování. Aktivovaný kal je tvořen mikroorganismy (bakterie) a nižšími organismy. Aktivace je tvořena nitrifikací, denitrifikací a regenerací.

Mikroorganismy jsou umístěny v aktivační nádrži. Pomocí těchto mikroorganismů dochází k odstranění organických látek. Aktivační nádrž musí být dobře provzdušňována, protože mikroorganismy potřebují k životu kyslík. Z aktivační nádrže je čerpána směs vyčištěné vody a aktivovaného kalu do dosazovací nádrže [6].

3.2.2 Dosazovací nádrže

Dosazovací nádrže se konstrukčně podobají nádržím usazovacím. Obvykle se od sebe liší větší hloubkou, a to z důvodu dosažení většího zdržení. V procesu čištění se nacházejí za aktivačními nádržemi. V těchto nádržích dochází k separaci aktivovaného kalu od vyčištěné vody. Záměrem procesu je dosáhnout dobře vyčištěného a stabilizovaného odtoku z čistírny. Poslední stupeň biologického čištění zahrnuje separaci aktivovaného kalu. Usazený kal se dělí na vratný, který je čerpán zpět do aktivace a přebytečný kal odcházející na zahuštění [12].

3.3 Kalové a plynové hospodářství – zpracování kalů

V kalovém a plynovém hospodářství probíhají procesy, které jsou zaměřeny na zpracování primárního kalu z usazovacích nádrží mechanického stupně čištění a přebytečného biologického kalu. Tyto procesy můžeme dělit na mechanické, biologické a na proces zpracování vzniklého bioplynu. Mechanické procesy zahrnují zahušťování, odvodňování a odvoz kalu. Naopak biologické procesy představují anaerobní, popř. aerobní stabilizaci [6].

3.3.1 Zahušťování kalu

Zahušťování kalu se často používá ke snížení hydraulického zatížení kalového hospodářství. Pomocí mechanických a gravitačních způsobů dochází k odstranění vody, čímž je dosaženo podstatného snížení objemu kalu. Dále se zahušťováním kalu výrazně

sníží provozní náklady a náklady na ukládání kalu. Zahuštění biologických kalů může být v rozmezí 3 až 6 % sušiny a primární kal v rozmezí 6 – 8 % sušiny. Zahušťování kalu se má provádět bezprostředně po jeho separaci. Zahušťovací nádrže se navrhují buď kontinuálně provozované podle zatížení plochy nerozpuštěnými látkami, nebo přerušované zahušťovací nádrže podle střední doby zdržení. K zahušťování jsou využívány technologie [2]:

- Gravitační zahušťování;
- Flotace;
- Centrifugy;
- Sítopásové lisy.

Gravitační zahušťování

Jsou používány 2 způsoby gravitačního zahušťování, a to zahušťování v procesu a oddělené zahušťování. Zahušťování v procesu probíhá v kalovém prostoru usazovací nádrže. Toto zahušťování je velmi efektivní pro primární kaly. Naopak oddělené gravitační zahušťování je vhodné pro primární kaly, chemické kaly a kaly z biologického čištění s přísadou biomasy. Hodnoty zahuštění jsou považovány za podprůměrné při obsahu sušiny méně než 3,5 %, průměrné při 3,5 - 4,5 % sušiny a nadprůměrné při obsahu sušiny nad 4,5 %.

Flotace

Flotace je převážně používána pro aktivovaný kal, i když se používá pro zahušťování směsi primárního a aktivovaného kalu. Principem flotace je, že malé bublinky vzduchu se vhánějí pod tlakem a kal je přesycen kyslíkem nebo dusíkem, což má za následek formování malých bublinek při snížení tlaku, které přilnou k pevným látkám v kalu. Poté směs flokuluje k povrchu a odebírání se mechanicky. Hlavní nevýhodou flotace je citlivost na kalový index a další nevýhodou je vývin zápachu.

Centrifugy

Odstředivky jsou používány pro zahušťování primárního kalu a přebytečného aktivovaného kalu. Největšího využití je dosahováno u aktivovaného kalu. Odstředivky využívají odstředivé síly, která je 2000x větší než gravitace. Hlavní výhodou odstředivek je, že efektivní separace lze dosáhnout relativně malým zařízením. Nevýhodou jsou poměrně vysoké investiční a provozní náklady.

Sítopásové lisy

Sítopásové lisy představují poměrně novou metodu zahušťování. Za účelem flokulace kalu a oddělení volné vody se do kalu přidává polymer, což je nezbytné. Na pásový lis se dávkuje flokulovaná směs (kal – voda) a dochází k oddělení vody. Na konci jednotky poté vypadává zbylý kal [2].

3.3.2 Vyhnívací nádrže – stabilizace a hygienizace

Do vyhnívací nádrže je přiváděna směs primárního a přebytečného biologického kalu. Vyhnívací nádrže jsou využívány především pro stabilizaci čistírenských [6]. *Stabilizace kalu* představuje takové biologické či fyzikálně – chemické zpracování kalu, které zabezpečuje jeho hygienickou nezávadnost a relativní stabilitu vůči jeho dalšímu využití. Princip stabilizace je založen na poklesu přítomnosti patogenních a ostatních živých organismů a také ve snížení rozložitelného organického podílu sušiny kalu. Stabilizovaný kal nemá sklon k dalšímu rozkladu, proto při skladování nezpůsobuje hygienické a pachové problémy [10].

Cílem stabilizace kalu je [6]:

- Redukce odbouratelné organické hmoty (omezení zápachu),
- Zlepšení odvoditelnosti,
- Redukce hmotnosti a množství kalu a zisk využitelného produktu.

Nejpoužívanějšími způsoby stabilizace jsou anaerobní, aerobní a chemická stabilizace. Nejrozšířenější metodou zpracování kalů je jejich anaerobní stabilizace, při níž dochází k přeměně organických látek na bioplyn, který je energeticky využitelný. Dominantním prvkem kalového hospodářství jsou anaerobní reaktory (vyhnívací nádrže) [10].

Anaerobní stabilizace kalu

Anaerobní digesce je obvyklým způsobem stabilizace směsného surového kalu na velkých čistírnách odpadních vod. Anaerobní stabilizace je proces, během kterého směsná kultura mikroorganismů postupně rozkládá za anaerobních podmínek biologicky rozložitelnou organickou hmotu. Výslednými produkty tohoto rozkladu jsou bioplyn a stabilizovaný kal [13]. Bioplyn je tvořen převážně methanem (60-70 %), oxidem uhličitým (30 – 40 %) a malými procenty sulfanu,

dusíku a vodíku. Stabilizovaný kal představuje směs vzniklé anaerobní biomasy, což je za daných podmínek již nerozložitelný zbytek organických látek a inertní anorganický podíl. V rámci anaerobní stabilizace dochází k poklesu organické sušiny, a to z důvodu přeměny na bioplyn. Také dochází k částečné hygienizaci kalu, kdy se potlačuje výskyt patogenních mikroorganismů [2].

V dnešní době jsou provozovány především dva způsoby anaerobní stabilizace, a to mezofilní a termofilní. Ve většině případů se u nás provozuje *anaerobní stabilizace mezofilní*, která probíhá při teplotách 35 – 40 °C. Doba zdržení mezofilní stabilizace je v rozmezí 20 – 30 dní. Mezofilní proces se obvykle skládá ze dvou stupňů, kdy první stupeň je míchaná anaerobní nádrž, kde dochází k vlastnímu procesu stabilizace. Druhým stupněm je uskladňovací nádrž, kde dozrívají stabilizační procesy a dochází zde k oddělení kalu od kalové vody. Tento kal je čerpán na odvodnění a kalová voda se čerpá zpět do aktivace. Naopak *termofilní anaerobní stabilizace* je modernější metoda, která probíhá při teplotách 55 – 60 °C. Z tohoto důvodu lze snížit dobu zdržení na 10-15 dní. Doba zdržení závisí na kinetice a zatížení procesu. Podmínkou je, že doba zdržení musí být tak dlouhá, aby došlo k požadovanému rozkladu organických látek. Při tomto typu anaerobní stabilizace je dosahováno vyšší rychlosti rozkladu organických látek a jeho větší účinnosti, čímž je zvýšena produkce bioplynu. Vyšší teplota procesu také zajišťuje účinnější hygienizaci [14].

Efektivita anaerobní technologie stabilizace kalů je možné zvýšit intenzifikací procesu, která může být dosažena zejména [2]:

- Lepším zahuštěním surového kalu (prostřednictvím strojního zahušťování).
- Optimalizací provozních podmínek (míchání, teplota, způsoby dávkování).
- Dezintegrace vstupního kalu.
- Přechod z mezofilního procesu na termofilní, čímž se dosáhne lepší účinnosti rozkladu, vyšší produkce bioplynu a úplná hygieničce kalu).

Aerobní stabilizace kalu

Aerobní stabilizace kalu je vhodná pro menší čistírny odpadních vod, kdy vyžaduje méně investic a údržby ve srovnání s anaerobní stabilizací [15]. V rámci aerobní stabilizace dochází k likvidaci patogenů a úbytku organické hmoty, tak jako v případě anaerobní stabilizace. Aerobní stabilizace je založena na prodloužené

aeraci kalu, kdy dochází k oxidaci většiny organických látek. Lze ji provést přímo v aktivaci jejím zvětšováním a prodlužováním stáří kalu nad 20 – 30 dní v závislosti na teplotě nebo provzdušňováním přebytečného aktivovaného kalu v oddělené stabilizační nádrži. Výhodou je, že v oddělené stabilizační nádrži může být koncentrace kalu mnohem vyšší než v aktivační nádrži [10].

V posledních letech se začíná aplikovat tzv. autotermní aerobní stabilizace, při které dochází vlivem intenzivního provzdušňování a rychlé oxidace organických látek k nárůstu teploty nad 50 °C. Tento proces je schopen si sám udržovat termofilní podmínky prostřednictvím exotermního metabolismu termofilních mikroorganismů, kdy při biologické oxidaci organického uhlíku dochází k uvolňování tepla. Proces aerobní stabilizace je schopen udržovat požadovanou stabilizační teplotu. Tento typ aerobní stabilizace je možné zintenzivnit aerací kyslíkem. Teplota stabilizace závisí na typu aerace (kyslík/vzduch) a na zahuštění kalu. Vyšších teplot stabilizace lze dosáhnout větším zahuštěním kalu. Optimální podmínky jsou při zahuštění kalu 4 – 6 % obsahu sušiny a aeraci kyslíkem, kdy dosahujeme stabilizačních teplot 55-60 °C. Při těchto teplotách dochází k rozkladu patogenů a potlačení zápachu. Doba zdržení je 25-30 dní. Pro úspěšné provozování autotermní aerobní stabilizace je potřeba splnit tyto podmínky: dostatečně zahuštěný vstupní kal, izolace stabilizační nádrže, efektivní míchání a aerace. Pokud kal obsahuje velké množství vody a má nízký podíl rozložitelných organických látek, není tento proces funkční, tj. nedochází k samovolnému zahřívání kalu [14].

Chemická stabilizace

Tento proces je založen na přidavku páleného vápna. Vápno se přidává v takovém množství, aby bylo dosaženo $\text{pH} > 12$ po dobu alespoň 2 hodin, případně aby po čtrnáctidenním působení přesahovaly hodnoty $\text{pH} 11$. Inaktivace většiny mikroorganismů je způsobena zvýšením pH a teploty. Tyto mikroorganismy by se mohly podílet na rozkladu tohoto kalu, čímž by byla zajištěna stabilita kalu. Volný amoniak, který je uvolňován při zvýšení pH , má podobný dezinfekční účinek. Dávka vápna je v rozmezí 10 a 30 % sušiny kalu. Tento postup je jednoduchý a má velmi dobrý dezinfekční účinek. Naopak jeho nevýhodou je nárůst celkové sušiny kalu a uvolňování amoniaku do atmosféry [10].

Hygienizace kalu

Jedná se o proces, při kterém dochází ke snižování bakteriální kontaminace kalu. Podstata tohoto procesu spočívá ve vytvoření prostředí, ve kterém nejsou bakterie schopny přežít. Hygienizace je prováděna na základě legislativních předpisů, a to z důvodu omezení nebezpečných vlastností kalů.

K hygienizaci kalů lze využít všechny metody, při kterých dochází k usmrcování mikroorganismů. Hygienizační metody lze rozdělit do tří skupin:

- *Chemické metody* – zahrnují reakci s chemickými činidly – vápno, minerální kyseliny (úprava kalu páleným vápnem; úprava kalu vápnem).
- *Fyzikální metody* – zahrnují působení teploty, radiace, ultrazvuku apod. (termická předpraha tekutého kalu s následnou mezofilní nebo termofilní anaerobní stabilizací kalu; pasterizace kalu; tepelné sušení kalu).
- *Biotechnologické metody* – zahrnují souběžný proces stabilizace a hygienizace kalů (dlouhodobé skladování kalu v tekutém stavu; aerobní stabilizace kalu při okolní teplotě; termofilní aerobní stabilizace kalu; mezofilní anaerobní stabilizace; termofilní anaerobní stabilizace).

Hygienizačního účinku je dosahováno v technologické lince zpracování kalů. Hygienizační metody jsou děleny podle zařazení hygienizační metody do technologické linky zpracování kalů na metody před procesem stabilizace, metody tvořící součást stabilizace a metody po stabilizaci. Výběr metody hygienizace kalu závisí na technologii stabilizace a na velikosti čistírny odpadních vod.

V praxi je nejvíce uplatňovanou metodou hygienizace kalu úprava kalu vápnem. K hygienizaci kalu dochází při úpravě kalu páleným vápnem, a to v důsledku spolupůsobení zvýšené teploty a hodnoty pH. Při úpravě kalu vápnem dochází k hygienizaci pouze v důsledku zvýšené hodnoty pH [2].

3.3.3 Uskladňovací nádrž

Uskladňovací nádrže se používají na uskladnění vyhnílého kalu před jeho odvodněním. Jsou dimenzovány na dobu zdržení 150 dní. Překročením této doby zdržení dochází zpravidla k provozním obtížím, jako jsou zápach a špatné zahuštění kalu. Promíchávání v uskladňovacích nádržích je zabezpečeno míchadly.

3.3.4 Odvodnění kalu

Nezbytným předpokladem pro další zpracování kalů, také pro manipulaci s nimi, jejich přepravu a likvidaci je odvodnění kalů [16]. K odvodňování kalu se v současné době používají především odstředivky nebo pásové lisy. Kaly se mohou dále odvodňovat na kalolisech, vakuových bubnových filtrech.

Do odvodňovacího zařízení je přiváděn stabilizovaný a zahuštěný kal. Po odvodnění kalu vystupuje z odvodňovacího zařízení odvodněný kal a filtrát (fugát). Takto získaný kal má obsah sušiny 20 – 40 %. Filtrát se čerpá zpět do aktivace a opět je čištěn v čistícím procesu.

Způsob stabilizace kalu ovlivňuje kvalitu a složení fugátu. Fugát po aerobní stabilizaci kalu má obvykle nízký stupeň znečištění. Naopak fugát po anaerobní stabilizaci kalu má vysoký obsah organických látek a také sloučeniny fosforu a dusíku.

Kvalita odvodnění kalu se hodnotí prostřednictvím procentuálního obsahu sušiny v odvodněném kalu a obsah nerozpuštěných látek ve fugátu, který by neměl přesáhnout 1000 mg/l. V případě odvodňování aktivovaného kalu je získáván nízký obsah obsahu sušiny. Při nízkých hodnotách obsahu sušiny vykazuje hmota pastovitou nebo kašovitou konzistenci, čímž dochází ke vzniku problémů při další manipulaci s kalem. Tomuto lze předcházet např. přidáním práškového vápna v procesu hygienizace [6].

Odvodňovací zařízení

a) Pásové lisy

Za účelem volné vody z kalu dochází u pásového lisu ke kombinaci dávkování polymerů s tlakem. Přitékající kal se mísí s polymerem, aby docházelo k flokulaci pevných látek a vytvořila se volná voda. Použitím surových kalů lze získat vyšší obsah sušiny.

b) Kalolisy

Kalolisy se využívají v případě, kdy chceme dosáhnout vysoké koncentrace sušiny. Do kalu se dávkuje flokulant a poté se na tento kal aplikuje vysoký tlak. Filtrovaná suspenze se pod tlakem přivádí do filtračních komor, které se skládají z hydraulicky stlačených desek. V komorách dochází k akumulaci pevných látek a voda je vytlačována přes porézní tkaninu, tzv. filtrační plachetka, na které se vytváří filtrační koláč. Nevýhoda kalolisu je přerušovaný provoz. Vápno nebo chlorid železitý a polymery

jsou obvykle používány jako koaguláty. Při tomto způsobu odvodnění kalu se dosahuje koncentrace sušiny 35 – 45 %.

c) Odstředivky

Separace kapaliny a pevných látek o různých hustotách se provádí v odstředivkách pomocí odstředivé síly, obvykle v rotujícím bubnu. Do otáčejícího vnitřního bubnu se přivádí suspenze, která je usměrňována k plášti vnějšího bubnu. Těžší částice jsou usazovány na povrchu vnějšího bubnu vlivem odstředivé síly. Pomocí šneku jsou kontinuálně posunovány do kuželové části bubnu. Odtud je zhuštěný sediment vyhrnut prostřednictvím šneku do výsypné části odstředivky, z které sediment vypadává do prostoru pod odstředivkou. Odstředěnou kapalinu pak vytlačuje kontinuálně přiváděna suspenze. Odstředěná voda přepadává přes odpadní otvor víček v čele bubnu, shromažďuje se ve sběrači a odvádí se potrubím z odstředivky. Zlepšení koncentrace sušiny lze dosáhnout dávkováním polymerů. Koncentrace odvodněného kalu závisí na typu kalu [2].

Koagulanty a flokulanty

Na čistírnách odpadních vod se nejčastěji koagulanty dávkuje do aktivačních nádrží, čímž dochází ke vzniku zárodků vloček aktivovaného kalu prostřednictvím elektrostatických sil. V aktivačních nádržích dochází k promíchávání vody a proudění vody, což napomáhá tvorbě zárodků aktivovaného kalu. V aktivaci se odstraňuje pomocí koagulantů fosfor. Hlinité nebo železité soli, především sírany a chloridy se obvykle využívají jako koagulanty.

Před strojním odvodněním kalu se obvykle přidávají flokulanty, čímž je zajištěno snížení specifických filtračních odporů, kdy je potřeba je snížit zhruba o dva řady před odvodňováním kalu. Volba typu polymerního organického flokulantu a jeho dávkování závisí na obsahu organické sušiny a druhu kalu [6].

3.3.5 Sušení kalu

Sušení kalů z ČOV probíhá těmito základními metodami [2]:

- *Prímé sušení* (kontaktní) – přímý kontakt kalu se sušícím médiem, kterým je vzduch (pneumatické sušárny, rotační nebo bubnové sušárny, fluidní sušárny).

- *Nepřímé sušení* (konvekční) – sušení externě vyhřívaným horkým povrchem (lopatkové sušárny a diskové sušárny).
- *Smíšený typ konvekčně – kontaktních sušáren.*
- *Sušárny s infračervenými zářiči nebo vysokofrekvenčním ohřevem.*

Přímý kontakt mezi kalem a přehřátým plynem vzniká při přímém sušení, kdy přehřátý plyn způsobuje vypařování vodní páry z kalu a poté ji ze systému odnáší. Nevýhodu technologie představují vysoké pořizovací náklady, také poměrně vysoký obsah těkavých organických látek ve vzduchu vycházejícího ze sušárny a nutnost recirkulace kalu v sušárně.

Při **částečném sušení** je kal vysušen na sušinu 50 – 70 %, což vystačuje pro skládkování, spalování bez mezideponie, popř. k přidávání do kompostů.

Při **úplném sušení** kalu dochází k vysušení na sušinu 90 – 95 %, kdy dosáhneme úplné hygienizace kalu. Přenos tepla v sušárnách potřebného k odpaření vody je buď kontaktní, nebo konvekční. Některé typy sušáren využívají oba mechanismy sušení.

Sušení kalu z ČOV je dáno 4 technologiemi, kterými jsou nízkoteplotní sušení, vysokoteplotní sušení, solární sušení a infračervené – rotační bubny.

Kal je při **nízkoteplotním sušení** sušen prostřednictvím odpadního tepla z kogenerace. V rámci první fáze dochází pouze k zahřívání kalu a nedochází k uvolnění těkavých organických látek. Dosušení kalu se poté provádí na perforovaném pásu v teplovzdušném tunelu. Tato technologie je typická nízkými emisemi. Její výhoda spočívá v nízké spotřebě, naopak nevýhodou je vysoké naddimenzování sušárny a klesající stabilita procesu, která je způsobena kolísáním klimatických teplot.

Při **vysokoteplotním sušení** dochází k sušení kalu využitím odpadního tepla z kogenerace. Ve druhém stupni se kal vysuší v procesu vysokoteplotního sušení. Tato technologie vyžaduje dodatečnou externí energii. Princip sušení je dán průchodem horkého vzduchu přes perforovaný dopravník. Nepřímé vytápění se provádí olejem nebo zemním plynem. Výhodou metody je možnost snížit dimenzování kapacity zařízení. Technologie zahrnuje různé stupně sušení v sušících komorách a její provoz není závislý na klimatických podmínkách.

Solární sušení kalu probíhá v prosklené hale, kdy není nutné do procesu sušení zasahovat. Vznikající emise jsou odstraňovány pomocí silných ventilátorů. Výhoda

technologie je nízká spotřeba energie. Naopak nevýhodou jsou vyšší investiční náklady [2].

3.3.6 Plynojemy

Plynojemy jsou využívány k akumulaci bioplynu vzniklého při procesu anaerobní stabilizace a slouží také k udržování tlaku. Do plynojemů je bioplyn přiváděn z vyhnívacích nádrží. Využití bioplynu může být v kogeneračních jednotkách nebo v plynových kotlích. Přebytečný bioplyn je spalován prostřednictvím hořáků zbytkového plynu [6].

3.3.7 Kogenerační jednotky

Kogenerace spočívá ve spalování bioplynu ve spalovacím motoru nebo turbíně za vzniku energie a tepla, kdy je možné dosáhnout přibližně 80% - ní účinnosti. Využitelné odpadní teplo je získáváno z chladicí vody, mazacího oleje a výfukových plynů. Vysokého využití energie obsažené v bioplynu je dosahováno díky kombinované výrobě. Vyprodukované teplo se především využívá pro ohřev kalů ve vyhnívacích nádržích a pro vytápění objektů čistírny [8].

4 Kaly z ČOV

Pojmem odpadním kal je označována směs dvou nebo více odpadních látek, přičemž musí být nejméně jedna z těchto látek přítomna v kapalném skupenství a vytvářet souvislou kapalnou fázi. V tuhém skupenství musí být nejméně jedna další látka, která musí být dispergována v souvislé kapalně fázi [1].

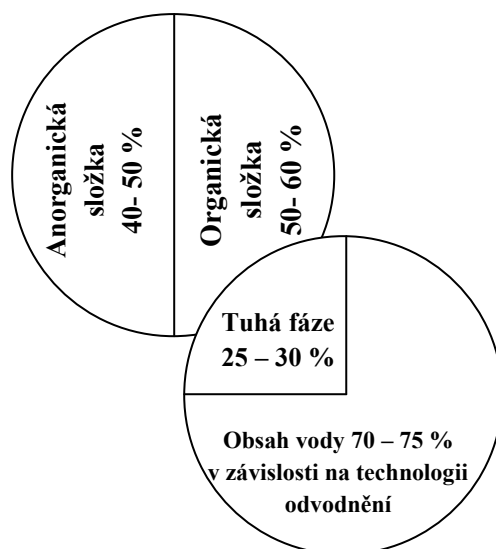
4.1 Složení kalů

Čistírenský kal představuje směs inertních organických látek a anorganické složky. Procentuální zastoupení organické a anorganické složky a také obsah tuhé fáze a vody v kalech je znázorněno na **Obrázku 2**. Inertní organické látky jsou živé a mrtvé buňky mikroorganismů, které se podílí na čistírenských procesech – čištění vod a stabilizace kalu.

Kal je vodná suspenze tuhých a koloidních částic organických a anorganických látek a obsahuje:

- Netoxické organické látky (cukry, tuky, bílkoviny, vosky, huminové látky) až 60 % v susině a sloučeniny fosforu a dusíku.
- Toxické látky [2]:
 - Těžké kovy: Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, Cd, Hg, As,
 - PCB, PAU, PCDD/F, EOX, uhlovodíky C₁₀-C₄₀, pesticidy, alkylsulfofenoly, polyfenoly.
- Mikroorganismy z čistírenského procesu a jiné včetně patogenních.
- Minerály: křemen, živce, karbonáty, vivianit, Fe-oxidy.
- Voda.

Typické složení vysušeného kal z komunálních čistíren je uvedeno v **Tabulce 1**. Průměrné obsahy těžkých kovů obsažených v kalech z ČOV jsou uvedeny v **Tabulce 2**.



Obrázek 2 Složení kalů [2]

Tabulka 1 Složení kalu [2]

	Jednotky	Kal z komunálních ČOV (sušina)
Obsah vody	[hm. %]	2,0 – 10,0
Obsah popela	[hm. %]	20 - 30
Těkavé látky	[hm. %]	20 – 50
Výhřevnost	[MJ/kg]	8000 – 12000
Uhlík	[hm. %]	20 – 30
Vodík	[hm. %]	1,5 – 5,0
Kyslík	[hm. %]	8 – 16
Dusík	[hm. %]	1 - 5
Síra	[hm. %]	1 - 2

Tabulka 2 Průměrné obsahy rizikových prvků v kalech z ČOV v ČR [2]

	Pb	Cd	Cr	Hg	Ni	Zn	Cu	As
[mg.kg⁻¹ sušiny]	103	3,2	161,8	3,8	44	1478	236	13

4.2 Vlastnosti kalů

Vlastnosti kalů z čistíren odpadních vod závisí na způsobu jejich vzniku a předchozí úpravě.

Běžně se vlastnosti kalů rozdělují na fyzikální, chemické, biologické parametry a ekotoxicitu.

- Fyzikální parametry udávají základní informace o upravitelnosti kalů.
- Chemické vlastnosti popisují přítomnost živin a toxických nebo nebezpečných složek, které jsou obsaženy v kalech.
- Vlastnosti biologické poskytují informace o organické složce a mikrobiální aktivitě kalu, tedy informace o přítomnosti patogenů a virů.
- Ekotoxicita, která je posuzována na základě požadavků vyhlášky č. 294/2005 Sb.

4.2.1 Fyzikální vlastnosti kalů

Kal je tvořen rozpuštěnými, koloidními i suspendovanými látky, ale ve většině případů převažují látky suspendované. Obsah suspendovaných látek je obvykle mnohem vyšší než obsah vody. V kalech může být voda vázána několika různými způsoby. Voda v kalech je rozdělována následovně:

- Volná voda,
- Volná kapilární voda,
- Fyzikálně vázaná voda,
- Vázaná voda:
 - Biologicky vázaná voda – součást buněk živých organismů žijících v kalech a je vázána molekulovými silami,
 - Chemicky vázaná voda – součást krystalové mřížky molekul nebo minerálních fází vyskytujících se v kalech,
 - Fyzikálně vázaná voda (koloidy) – vázána prostřednictvím povrchových sil, které se vyskytují na hranicích mezi jednotlivými fázemi.

Volná voda je zadržována pouze gravitační silou. Tato voda se nachází především mezi jednotlivými částicemi kalu a lze ji odstranit na základě gravitační sedimentace (zahušťování). Volná kapilární voda se v kalech zadržuje pomocí adhezních a kohezních sil a její odstranění z kalu se provádí mechanickým odvodňováním bez použití chemických činidel (centrifugy). Fyzikálně vázaná voda se nachází mezi kalovými částicemi. Vázaná voda je prostřednictvím svých povrchových sil spojena s koloidními

částicemi a k odstranění této vody je potřeba zrušit elektrický náboj těchto částic. Kapilárními silami, které vznikají slučováním malých částic kalu do větších celků, je v kalech zadržována také voda kapilárně vázaná. Aby mohlo dojít k uvolnění kapilárně vázané vody, musí být na kal vyvinuta větší síla, než je síla kapilární. Rozrušením buněčné hmoty nebo termickými pochody lze odstranit vodu vázanou v buněčné hmotě.

Suspendované látky v kalu mohou být na základě jejich přitažlivosti k okolní vodě (afinita) hydrofilní nebo hydrofobní. Ke vzniku poměrně pevných vazeb dochází při reakci povrchu hydrofilních částic s molekulami vody, naopak hydrofobní částice takové vazby netvoří. Schopnost kalu uvolňovat vodu závisí na těchto vlastnostech, které se promítají do zpracování kalů.

Základním parametrem kalu je *obsah sušiny kalu*. Obsah sušiny se stanovuje odpařením vody při 105 °C jako hmotnostní podíl p_s . Látky těkavé při této teplotě se odstraní odpařením s vodou, ale jejich množství je zanedbatelné. Do sušiny kalu se započítávají i látky původně rozpuštěné, které se neodpařily a zůstaly v sušině. Tyto látky by se mohly v běžném procesu odseparovat, kdy by zůstaly v kalové vodě, filtrátu apod. Podíl těchto látek je v sušině velmi malý, nachází se v rozmezí 0,5 – 1,0 g.l⁻¹. Obsah sušiny a vody v kalu se běžně vyjadřují v %. Platí rovnost:

$$p_s + p_v = 1, \quad (1)$$

kde p_s – hmotnostní podíl sušiny a p_v – hmotnostní podíl vody v kalu.

Primární kal, který je odebírán z prvního stupně, má obsah sušiny kolem 2,5 %, obsah vody v tomto kalu je tedy 97,5 %. Obsah sušiny přebytečného kalu bývá pouze 0,5-1,0 %, obsah sušiny je možné zvýšit zahuštěním na 4 – 6 %, v tomto případě jde stále o tekutou konzistenci kalu. Kal má po stabilizaci a odvodnění konzistenci podobnou zemině, kdy obsah sušiny je v rozmezí 20 – 50 %. Obsah více než 90 % sušiny kalu lze získat následným termickým zpracováním.

Základní fyzikální parametry kalu jsou uvedeny v **Tabulce 3**.

Tabulka 3 Základní fyzikální parametry [2]

Obsah sušiny	Základní parametr – koncentrace sušiny
Obsah organické sušiny	Základní parametr – koncentrace organických látek
Kalový index	Měřítka sedimentovatelnosti
Kondicionace	Spotřeba činidel
Velikost částic	Popis částic
CST (Capillary Suction Time)	Odvodňovací testy
Distribuce vody	Vliv na odvodňování
Hustota	Vliv na odvodňování na centrifugách
Filtrační odpor	Vliv na odvodňování
Reologické vlastnosti	Vliv na čerpání
Výhřevnost	Vliv na spalování

V sušině kalu jsou zastoupeny dvě složky:

- Organická složka,
- Anorganická složka.

Podíl organické složky p_{so} se určuje jako ztráta žiháním při teplotě 550 °C, kdy dochází ke shoření organických látek a anorganické látky zůstávají nerozloženy jako zbytek po žihání p_{sa} .

Kalový index KI udává objem usazeného kalu po 30 minutách sedimentace, které se vztahuje na koncentraci sušiny kalu. Kalový index se vyjadřuje v jednotkách ml.g^{-1} . Lze tedy konstatovat, že hodnoty kalového indexu do 100 ml.g^{-1} představují dobře sedimentující kal, naopak při hodnotách vyšších než 200 ml.g^{-1} bude s největší pravděpodobností docházet k bytnění kalu a vzniku vláknitých mikroorganismů, kdy výskyt těchto mikroorganismů v biocenóze aktivovaného kalu je příčinou špatných separačních vlastností.

Spalné teplo udává množství tepla, které se uvolní při dokonalém spálení 1 kg látky (u plynů 1 m^3) a měří se v jednotkách kJ. Pokud palivo obsahuje vodík nebo vodu, tak po jeho spálení vzniká vodní pára. Při hoření paliva dochází k úniku vodní páry do ovzduší, přičemž sebou odnáší své skupenské teplo vypařováním. Na odpaření vody obsažené v palivu a vody vznikající při hoření se spotřebuje část energie uvolněné dokonalým spálením.

Důležitým parametrem jakosti paliv je jejich *výhřevnost*. Jedná se tedy o spalné teplo, které je zmenšené o výparné teplo vody. Výhřevnost má vždy nižší hodnotu než spalné teplo.

Výhřevnost se u kalů obsahujících cca 33 % anorganických fází, které nepodléhají termickému rozkladu, pohybuje okolo 14 MJ/kg sušiny. Pokud kaly obsahují pouze 50 % organických složek, tak dochází ke snížení jejich výhřevnosti na cca 11 MJ/kg sušiny. Výhřevnost surového kalu je vždy cca o 2 MJ/kg sušiny vyšší.

4.2.2 Biologické vlastnosti kalů

Biologické vlastnosti kalů se sledují na základě legislativních předpisů, kdy se hodnotí biologická rizika kalů z čistíren odpadních vod při jejich dalším využití. Především se v kalech sledují patogenní organismy (bakterie, viry, prvoci, helminty), indikátorové organismy (bakterie rodu *Salmonella* apod) [2].

4.3 Legislativa nakládání s kaly

Nakládání s kaly z ČOV se provádí podle zákona o odpadech, což je zákon č.185/2001 Sb. Tento zákon vešel v platnost 1. 1. 2002, ve znění pozdějších předpisů. Další zákonná ustanovení důležitá jak pro původce odpadu, tak pro zpracování nebo odstranění kalů vyplývají ze zákonů o vodách, ovzduší a půdě [6].

Kaly z komunálního čištění odpadních vod se řadí podle vyhlášky č. 381/2001 Sb., katalogu odpadů jako odpad ostatní, pod katalogovým číslem 190805 [17].

Kalem se podle zákona o odpadech rozumí [18]:

- 1. kal z čistíren odpadních vod zpracovávajících městské odpadní vody nebo odpadní vody z domácností a z jiných čistíren odpadních vod, které zpracovávají odpadní vody stejného složení jako městské odpadní vody a odpadní vody z domácností,*
- 2. kal ze septiků a jiných podobných zařízení,*
- 3. kal z čistíren odpadních vod výše neuvedených.*

Upraveným kalem podle tohoto zákona se rozumí *kal, který byl podroben biologické, chemické nebo tepelné úpravě, dlouhodobému skladování nebo jakémukoliv*

jinému vhodnému procesu tak, že se významně sníží obsah patogenních organismů v kalech, a tím zdravotní riziko spojené s jeho aplikací.

Použitím kalu je myšleno *zpracování kalu do půdy*. A programem použití kalů se rozumí *dokumentace zpracovaná v rozsahu stanoveném prováděcím předpisem právním předpisem* [18].

Surový kal je podle zákona o odpadech klasifikován jako odpad nebezpečný, a to z důvodu vysokého obsahu organických látek (okolo 70 %) a možné přítomnosti patogenních mikroorganismů. Proto je surový kal přímo na ČOV v lince zpracování kalů upraven a zpracován na stabilizovaný materiál, který se díky svým vlastnostem přímo využívá v zemědělství, buď přímo k hnojení a kondicionaci půdy, nebo po předchozím kompostování.

Producent odpadu má podle zákona o odpadech v rámci své činnosti nebo v rozsahu své působnosti povinnost zajistit přednostní využití odpadů před jejich odstraněním. Na prvním místě jsou recyklační technologie využití odpadů, následně spalování kalů s využitím energie a nakonec spalování bez využití energie.

Při posuzování vhodnosti způsobu odstranění odpadů se volí vždy ten způsob, kterým se zajistí vyšší ochrana lidského zdraví a je šetrnější k životnímu prostředí. Uložení na skládku mohou být odstraněny pouze ty odpady, u nichž není dostupný jiný způsob odstranění nebo by přinášel vyšší riziko pro lidské zdraví nebo riziko pro životní prostředí [6].

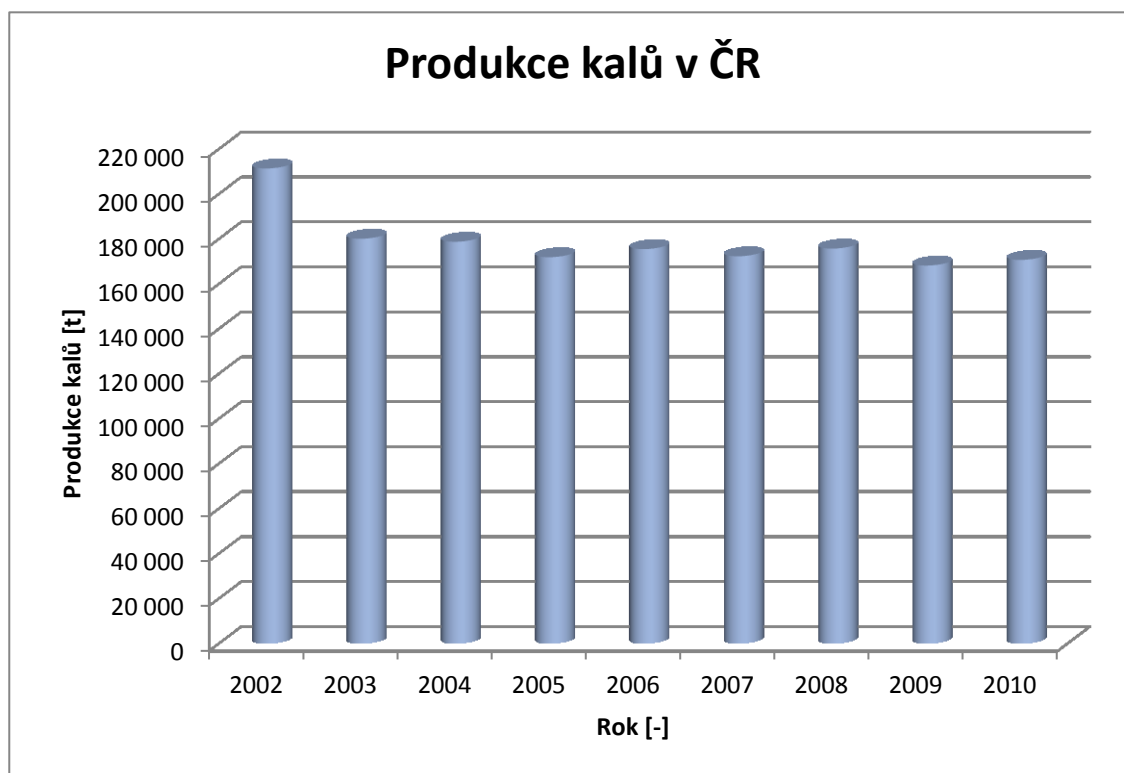
4.4 Způsoby nakládání s kaly

Nejrozšířenějšími způsoby nakládání s čistírenskými kaly jsou kompostování, přímá aplikace na půdu, rekultivace a skládkování [2]. V současné době nejčastější formou likvidace kalů je skládkování, které vyžaduje, aby byl kal odvodňován na 35 % pevných látek. Pomocí mechanických procesů, lze kaly s obsahem vody pouze odvodňovat do určité míry. Nad rámec této úrovně musí být odstraněna vlhkost pomocí tepelných procesů, které zahrnují vysoké investiční náklady a z tohoto důvodu jsou u nás málo zastoupené [19]. V **Tabulce 4** je uvedena produkce čistírenských kalů a způsoby jejich nakládání v jednotlivých letech. Produkce čistírenských kalů je graficky znázorněna v **Grafu 1**. Způsoby nakládání s čistírenskými kaly za rok 2010 je graficky znázorněn v **Grafu 2** [20].

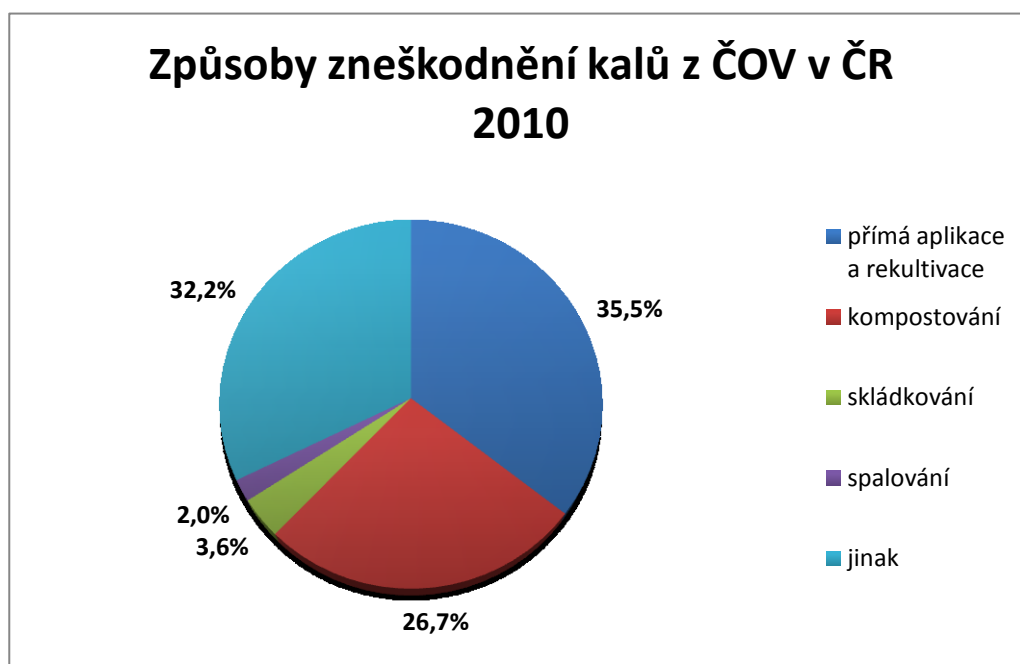
Tabulka 4 *Produkce čistírenských kalů a způsoby jejich nakládání [20]*

Rok	Produkce kalů celkem [t]	Způsob zneškodnění kalů				
		Přímá aplikace a rekultivace [t]	Kompostování [t]	Skládkování [t]	Spalování [t]	Jinak [t]
2002	211 364	17 570	101 746	39 659	290	52 099
2003	180 098	31 298	88 678	23 305	390	36 427
2004	178 749	29 119	87 469	25 447	39	36 675
2005	171 888	34 467	88 820	12 027	20	36 554
2006	175 471	48 304	89 932	13 979	27	23 229
2007	172 303	55 349	80 393	8 536	47	27 978
2008	175 708	46 776	78 289	11 986	712	37 945
2009	168 164	42 442	80 727	5 931	2 179	36 885
2010	170 689	60 639	45 528	6 177	3 336	55 009

Graf 1 *Produkce kalů v ČR v jednotlivých letech [20]*



Graf 2 *Způsoby zneškodnění kalů z ČOV v ČR za rok 2010 [20]*



5 Papírenské kaly

Pro experimentální část byly vybrány kaly vznikající při výrobě buničiny a papíru v rámci Biocelu Paskov a.s. V současné době podnik produkuje cca 30 000 t kalu ročně.

Průmyslová výroba buničiny je velmi energeticky náročná. Snahou je co nejvíce využít vloženou energii, vložené suroviny a minimalizovat odpad. Vedle buničiny, která je hlavním produktem výroby, vzniká i vysoce koncentrovaný organický odpad (papírenský kal) a velké množství organicky znečištěných vod, které se následně čistí na ČOV. Spolu s vyčištěnou vodou jsou druhým výstupem z procesu čištění čistírenské kaly, do kterých přechází až 80 % původního znečištění. Oba tyto odpady jsou charakteristické vysokým obsahem organického materiálu [21].

5.1 Výrobní postup v Biocelu Paskov a.s.

Papírenská buničina je vyráběna z 95 % ze smrkového dříví klasickým kyselým sulfitovým způsobem s hořečnatou zásadou diskontinuálně s protiproudou tlakovou regenerací SO_2 . Tříděné štěpky jsou z hromad odebírány pomocí mobilních mechanismů přes podzemní odběrová místa s odběrovými šneky. Do varny jsou vedeny dopravními pásy k plnění do vařáků. Vaření štěpků se provádí v devíti vařácích s varnou kyselinou za nepřímého ohřevu párou. Vařením štěpků se ze dřeva uvolní inkrustující látky (lignin), které se rozpustí a získá se surová nebělená buničina. Po ukončení várky a provedení odplynů je matečný výluh odtažen a po smíchání s pracím výluhem je odveden na odparku. V okruhu primární regenerace jsou odplyny z vařáků použity pro výrobu varné kyseliny.

Buničina se z vařáků odvádí do vyprazdňovacích zásobníků, odkud odchází k odsukování a třídění. V třídící lince dochází k oddělení suků, neprovarů a dalších nečistot, které se po slisování transportují na sklad dřevního paliva a odtud do kúrového kotle ke spalování. Prání buničiny se provádí na pracích lisech.

Vypraná a vytríděná buničina vstupuje do systému kyslíkové delignifikace a bělení, v nichž se využívá roztok NaOH . V kyslíkovém reaktoru se provádí delignifikace v alkalickém prostředí kyslíkem. Buničina je po vyprání vedena do tlakového alkalizačního stupně, kde dochází k další delignifikaci a bělení. Technologický proces je veden za určité teploty a tlaku. Do vysokokonzistenčního zásobníku odchází buničina po vyprání a okyselení.

Dále buničina prochází přes třístupňovou bělírnu. První stupeň je okyselovací s přidavkem oxidu chloričitého, druhý stupeň je tlakový peroxidový reaktor. Beztlakový peroxidový stupeň je využíván pro dosažení delší retenční doby a vyšší bělosti. Za každou bělicí věží je zařazen vakuový prací filtr [22].

Buničina VIAN PASKOV ECO je okyselována SO₂ vodou nebo kyselinou sírovou s přidavkem oxidu chloričitého.

Buničina VIAN PASKOV ECF je bělena pomocí chlordioxidové vody a dobřelena peroxidem vodíku.

Nebělená buničina VIAN PASKOV UNB projde kyslíkovou bělírnu do zásobníku odkud je vedena přímo na sušicí stroj.

Po vytrídění i těch nejmenších nečistot na tlakovém třídíči, vibračním třídíči a šesti bateriích vířivých třídíčů putuje buničina na sušicí stroj. Na sušícím stroji je odváděna na sítě, následně vylisována a nařezána na archy.

Jedním z vedlejších produktů je krmné droždí VITEX, které se získává zkvašováním cukrů z výluhu po várce. Využívá se na výrobu krmných směsí pro hospodářská zvířata. Zbylá část výluhu je spalována a ze spalín je připravována varná kyselina.

Dalším vedlejším produktem vyráběným mikrobiologickým odbouráním zkvasitelných cukrů z magnesiumbisulfitového výluhu jsou lignosulfonany VIANPLAST, které se využívají např. jako plastifikační přísada ve stavebním průmyslu, pojivo při výrobě dřevotřískových desek a sádrokartonů, pojivo pro granulaci hnojiv a krmiv v zemědělství [23].

Celkové technologické schéma výroby buničiny, krmných kvasnic a lignosulfonanů je znázorněno v **Příloze 1** [24].

Během výroby buničiny dochází ke vzniku velkého množství odpadních vod. Zdroji odpadních vod jsou: odparka, droždárna, praní, bělení, dřevosklad, přípravná a sušicí stroj. Odpadní vody z těchto zdrojů jsou potom odváděny na čistírnu odpadních vod, kde se čistí. Odpadní vody přitékají na ČOV o teplotě cca 37 °C a pH 4 – 5. Přítok činí průměrně 831 m³/h. V **Příloze 2** je znázorněno schéma čistírenské linky navazující na navazující na výrobu celulózy v podniku Biocel Paskov a.s [23].

5.2 Vznikající kaly

Z čistírny odpadních vod vystupují dva typy kalů:

- Primární (mechanický) kal,
- Přebytný biologický kal.

Primární (mechanický) kal je čerpán z primární usazovací nádrže v množství cca 300 až 400 m³/den. Kal tvoří sušinu 0,5-2,0 %. Tento kal obsahuje především vlákna celulózy, buničiny, dále mastek z procesu výroby celulózy, Al(OH)₃ z čiřiče, nerozpuštěné podíly vápna z ČOV a na ČOV vysrážený uhličitan, síran a siřičitan vápenatý.

Přebytný biologický kal je odtahován ze dna nádrže regenerace kalu v množství 500 až 1200 m³/den. Kal tvoří sušinu 0,5-1,0 %. Tento kal je tvořen směsí živých i odumřelých mikroorganismů z biologické aktivace, tj. bakteriemi, prvoky, houbami a sinicemi.

Oba tyto kaly jsou homogenizovány na směsný kal. K směsnému kalu je přidán polyflokulant, čímž dojde k tvorbě vloček kalu. Kal poté natéká na zahušťovací stroj, kde nastane zahuštění kalu. Dalším krokem je odvodnění kalu, které se provádí na úhlovém kalolisu. Odvodněním kalu je dosahováno sušiny v rozmezí 18-32 % a to v závislosti na složení a použitém flokulantu. Následně je kal vápněn a dopravován do kontejneru (viz. **Obrázek 3**) a odvážen ke zneškodnění.



Obrázek 3 Dávkování kalu do kontejneru [24]

Kal z výroby sulfitové buničiny je obecně označován také jako biomasa. Představuje lepidlou hmotu pastovitěho charakteru hnědé barvy, ve které jsou patrné zbytky celulóзовých vláken [22].

5.3 Experimentální činnost

Nevýhodou stabilizovaných papírenských kalů (viz. **Obrázek 4**) je jejich vysoká vlhkost, kterou je možno snižovat buď mechanicky (lisováním) nebo tepelně (sušením). Další nevýhodou je zápach těchto kalů.



Obrázek 4 Vzorek papírenského kalu (Zdroj: Autorka)

U dodaných vzorků papírenských kalů byl nejdříve stanoven obsah sušiny, a to odpařením vody při teplotě 105 °C. V **Tabulce 5** jsou uvedeny stanovené obsahy sušiny u vzorku těchto kalů. Vlhkost vzorku papírenských kalů se pohybovala v rozmezí 43-54 hm. %. U dodaných kalů byla provedena také elementární analýza a stanoveno spalné teplo a výhřevnost, kdy tyto výsledky jsou uvedeny v **Tabulce 6**.

Tabulka 5 Stanovené vlhkosti u dodaného vzorku papírenských kalů

Stanovení č.	W ^a [hm. %]
1.	43,50
2.	53,20
3.	50,20
4.	45,50
5.	48,50

Tabulka 6 Základní parametry dodaného papírenského kalu

	Dodaný vzorek kalu
Q_s^a při 25 °C [kJ.kg ⁻¹]	10060,00
Q_v^a při 25 °C [kJ.kg ⁻¹]	8021,10
H^a [hm. %]	3,95
N^a [hm. %]	2,61
C^a [hm. %]	30,40
S^a [hm. %]	0,21

V rámci experimentální části byly kaly lisovány přes šnekový lis (viz. **Příloha 3**) při teplotě 18 °C, čímž došlo k minimálnímu odstranění vody a natvarování kalu.

Následně byl kal sušen ve fluidní sušárně. Do fluidní sušárny bylo nadávkováno 1,2 kg natvarovaného papírenského kalu. Sušení probíhalo při teplotě 100 °C. Během sušení se kolem nadávkovaného kalu vytvořila pevná slupka, která zabránila nalepení kalu na rotující hrabla ve fluidním loži. Po 10 minutách sušení byl odebrán vzorek kalu a stanoven u něj obsah sušiny, který činil cca 15 hm. %. V sušení se proto pokračovalo dalších 10 minut. Celková doba sušení byla tedy 20 minut. Po ukončení sušení bylo získáno 0,2 kg vysušeného kalu. Na **Obrázku 5** je znázorněn vysušený papírenský kal.



Obrázek 5 Vysušený papírenský kal (Zdroj: Autorka)

U tohoto vysušeného kalu byl opět stanoven obsah sušiny (viz. **Tabulka 7**). Vlhkost vysušeného kalu se pohybovala v rozmezí 3-5 hm. %. Vysušením kalu bylo také dosaženo značného zmírnění zápachu. Vysušený kal je bezprašný produkt,

který je biologicky stabilní. Dále byl proveden základní rozbor tohoto vysušeného kalu, kdy výsledky analýz jsou uvedeny v **Tabulce 8**.

Pro toto sušení byl navržen fluidní reaktor s míchaným ložem ROTOFLUID II (viz. **Obrázek 6**).



Obrázek 6 *Fluidní sušárna a šnekový lis* (Zdroj: Autorka)

Principem fluidního sušení je udržení částic kalu ve vznosu vzestupným proudem vzduchu. Vyrovnáním tíhové síly materiálu a vzestupné síly média dojde k nadnášení materiálu. Při dalším růstu rychlosti proudícího média dochází k fluidizaci, kdy se materiál v pohybu vznáší. Sušení je prováděno intenzivním přenosem tepla ve fluidní vrstvě. Fluidní lože (viz. **Obrázek 7**) je prohříváno horkým proudícím médiem. Tím, že je fluidní lože profukováno ze spodní strany, je vysoušený kal udržován ve vznosu a odnímá mu vodu. Prachové částice jsou po průchodu cyklónem vráceny zpět do fluidního lože. Suchý granulát je odebírán z výstupu fluidní sušárny [25].



Obrázek 7 *Fluidní lože* (Zdroj: Autorka)

Tabulka 7 *Stanovené vlhkosti u vysušeného papírenského kalu*

Stanovení č.	Vlhkost [hm. %]
1.	3,95
2.	4,99
3.	4,24
4.	4,95
5.	4,56

Tabulka 8 *Základní parametry vysušeného papírenského kalu*

	Vysušený vzorek kalu
Q_s^a při 25 °C [kJ.kg ⁻¹]	11010,00
Q_v^a při 25 °C [kJ.kg ⁻¹]	9927,68
H^a [hm. %]	4,45
N^a [hm. %]	3,01
C^a [hm. %]	32,0
S^a [hm. %]	0,24

V praxi bude šnekový lis vybaven vyhříváním (150 – 180 °C), aby se kal zbavil částečně vázané vody, zápachu a natvaroval se do briket. Další možností kromě sušení ve fluidní sušárně je, že budou tyto brikety uloženy do speciálních skladovacích kontejnerů a nechají se samovolně větrat při sledování rovnovážné vlhkosti (při sledování vlhkosti foukaného vzduchu a vlhkosti materiálu při dané teplotě).

V praxi bude při sušení kal vstupovat do reaktoru přes šnekový lis, který odděluje pracovní prostor reaktoru od okolí. A přes turniketový uzávěr pak produkt reaktor opustí.

6 Zemědělské kaly – výpalky

Pro experimentální část byly vybrány jablečné výpalky z pěstitelské pálenice a moštárny Pod lipou ve Stříteži nad Ludinou (viz. **Obrázek 8**), která vyprodukuje průměrně 1000 t lihovarnických výpalků z peckovin a jablek za rok. Týdně vyprodukuje 80 m³ těchto výpalků. Pálenice je povinná je odvážet na ČOV, což pro ni představuje finanční zátěž.



Obrázek 8 Pálenice a moštárna Pod lipou ve Stříteži nad Ludinou
(Zdroj: Autorka)

6.1 Lihovarnické výpalky

Produktem technologického procesu destilace ovocných zákvasů je pálenka a výpalky. Výpalky jsou zbytkem po první destilaci zůstávající v destilačním kotli. Je to destilační obsahující veškerou netěkavou sušinu z kvasu. Lihovarnický zbytek u průmyslového lihovaru je ve většině případů využíván v krmivářském a chemickém průmyslu. Naopak je tomu u pěstitelských pálenic, které nejsou vybaveny vhodným technologickým zařízením určeného k zušlechťení výpalků k dalšímu využití, a proto se z něho stává odpad.

Výpalky jsou vypouštěny do sběrných jímek nejčastěji betonových a odtud jsou odváženy k likvidaci. Likvidace je značným problémem

s ohledem na ekologii. Lihovarnické výpalky jsou charakteristické vysokým obsahem vody, kterou je nutné odstranit. Svým složením představují na jedné straně velké nebezpečí pro životní prostředí a na druhé straně však mohou znamenat značné zvýšení rentability výroby alkoholu. Nebezpečí pro ŽP je dáno především vysokou hodnotou BSK₅, která je v rozmezí 15 000-60 000 mg O₂/l. Jsou také silně kyselé (nutná neutralizace vápnem), způsobují značné náklady na dopravu a udržování skládky ve vymezené lokalitě (nebezpečí kontaminace podzemních vod). Výpalky jsou majetkem pěstitele a ten je povinen je na svoje náklady odvést na určenou skládku nebo uhradit pálení náklady na jejich odvoz a likvidaci (existence neekologických metod).

Vlastnosti lihovarnických výpalků k energetickému využití jsou výrazně ovlivňovány zpracovatelskou technologií, v níž vznikají jako odpad. Mezi jednotlivými producenty lihovarnických výpalků jsou značné rozdíly. Výpalky mohou být zdrojem specifického zápachu, což souvisí s dobou jejich skladování. Výhřevnost kolísá v závislosti na obsahu vody, kdy obsah vody závisí na použité technologii. Nemalý vliv na kvalitu výpalků má rovněž chemické složení ovoce. V **Tabulce 9** je uvedeno složení ovocných a klasických lihovarnických výpalků [26].

Tabulka 9 Složení ovocných a klasických lihovarnických výpalků [26]

Složení ovocných a klasických lihovarnických výpalků					
Název položky	<i>Třešně</i>	<i>Švestky</i>	<i>Borůvky</i>	<i>Brambory</i>	<i>Kukuřice</i>
Voda [hm.%] – W^r	81,1	93,4	92,1	94,3	91,3
Sušina [hm.%]	18,9	6,6	7,9	5,7	8,7
Bílkoviny [hm.%]	1,6	0,4	0,7	1,2	2,0
Tuky [hm.%]	0,9	0,2	0,3	0,1	0,9
Buničina [hm.%]	7,0	0,6	1,5	0,7	0,8
Bezduškaté extrakt. látky [hm.%]	8,4	4,8	4,8	3,1	4,5
Minerální látky [hm.%]	1,0	0,6	0,6	0,7	0,5

Pecky z ovocného kvasu představovaly dříve téměř vždy neupotřebitelný odpad, který byl v lepším případě vyvážen na skládku, v horším případě se vyvážel na pole společně s kvasem. V současné době využívají pěstitelské pálenice metodu odpekování, čímž se po odsušení získává hodnotné palivo, které využívá buď sama pálenice, nebo je odkupováno lidmi pro topení v kamnech [26].

6.2 Experimentální činnost

V rámci experimentální části byl jako první stanoven obsah sušiny neseparovaných jablečných výpalků (viz. **Obrázek 9**). Obsah sušiny byl stanoven vypařením vody při teplotě 105 °C. Vlhkost neseparovaných jablečných výpalků se pohyboval v rozmezí 97-99 hm. %. V Tabulce 10 jsou uvedeny stanovené obsahy sušiny pro vzorek neseparovaných jablečných výpalků.



Obrázek 9 Neseparované jablečné výpalky (Zdroj: Autorka)

Tabulka 10 Stanovené vlhkosti u neseparovaných jablečných výpalků

Stanovení č.	W ^a [hm. %]
1.	98,70
2.	98,80
3.	98,83
4.	99,01
5.	97,13

Výpalky se nechaly samovolně usazovat po dobu jednoho dne. Po usazení bylo 30 l jablečných výpalků odstředováno. Odstředování bylo prováděno na rotačním separačním sítu o velikosti ok 0,025 mm (viz. **Obrázek 10**). Odstředování probíhalo při otáčení síta rychlostí 20 otáček za minutu a sklonu síta byl 5°. Přes separační rotační síto došlo k odstředění 15 l vody. Po odstředění výpalků byl opět stanoven obsahu sušiny, který byl okolo 48 hm. %. V **Tabulce 11** je uvedena stanovená vlhkost odstředěných jablečných výpalků. Odstředěné výpalky jsou znázorněny na **Obrázku 11**.



Obrázek 10 Rotační separační síto (Zdroj: Autorka)

Tabulka 11 Stanovené vlhkosti odstředěných jablečných výpalků

Stanovení č.	W ^a [hm. %]
1.	47,78
2.	47,88
3.	47,59
4.	47,96
5.	48,00



Obrázek 11 Odstředěné jablečné výpalky – kaly (Zdroj: Autorka)

V praxi se z důvodu vysokého obsahu vlhkosti výpalky nejprve zahustí. Následně se odkyselí nehašeným vápnem (vysoká kyselost – pH = 3). Tím se dosáhne vysrážení kalů, čímž se urychlí jejich sedimentace a usnadní se jejich odstředění.

Rotační separační síto bude vyhříváno, aby byla udržována teplota dodávaných výpalků, čímž se urychlí jejich odstředování.

Odstředěná voda byla zachycována a po biologickém vyčištění na biofiltrech (viz. **Obrázek 12**) byla vypuštěna do kanalizace.



Obrázek 12 *Biologické čištění* (Zdroj: Autorka)

Po odstředění bylo dále provedeno lisování těchto kalů. Lisování se provádělo na lamelovém lisu s pohyblivými lamelami (viz. **Obrázek 13**), do kterého byly kaly dávkovány pomocí kónického dávkovače. Lisováním došlo k dalšímu odstranění vody, kdy bylo získáno cca 5 kg vylisovaných kalů. Po vylisování kalů byl opět stanoven obsah sušiny. V **Tabulce 12** jsou uvedeny stanovené vlhkosti vylisovaných kalů. Vlhkost vylisovaných kalů byla okolo 35 hm. %.



Obrázek 13 *Lamelový lis s pohyblivými lamelami (Zdroj: Autorka)*

Tabulka 12 *Stanovené vlhkosti vylisovaných kalů*

Stanovení č.	W ^a [hm. %]
1.	35,32
2.	35,59
3.	34,98
4.	34,90
5.	35,35

U těchto vylisovaných kalů byla provedena elementární analýza a bylo stanoveno spalné teplo a výhřevnost. Výsledky elementární analýzy, spalné teplo a výhřevnost jsou uvedeny v **Tabulce 13**.

Tabulka 13 *Základní parametry vylisovaných kalů*

	Vylisovaný kal
Q _s ^a při 25 °C [kJ.kg ⁻¹]	21220,00
Q _v ^a při 25 °C [kJ.kg ⁻¹]	18846,81
H ^a [hm. %]	6,93
N ^a [hm. %]	1,15
C ^a [hm. %]	48,50
S ^a [hm. %]	0,08

Vylisovaný kal je zobrazen na **Obrázku 14**.



Obrázek 14 *Vylisovaný kal* (Zdroj: Autorka)

Poté byly zemědělské kaly vysušeny při teplotě 100 °C ve fluidní sušárně stejným způsobem jako papírenské kaly. Po vysušení byl u kalu stanoven obsah vlhkosti, který byl okolo 4 hm. % U takto vysušených kalů byla provedena elementární analýza a stanoveno spalné teplo a výhřevnost, kdy výsledky jsou uvedeny v **Tabulce 14**. Na **Obrázku 15** je znázorněno zařízení pro odvodnění výpalků.



Obrázek 15 *Zařízení pro odvodnění výpalků* (Zdroj: Autorka)

Tabulka 14 *Základní parametry vysušených zemědělských kalů*

	Vysušený kal
Q_s^a při 25 °C [kJ.kg ⁻¹]	21580,00
Q_v^a při 25 °C [kJ.kg ⁻¹]	19995,60
H^a [hm. %]	6,81
N^a [hm. %]	1,19
C^a [hm. %]	50,10
S^a [hm. %]	0,09

Další možnost je, že se vylisované výpalky pomocí vyhřívaného šnekového lisu natvarují do briket a nechají se samovolně větrat při sledování relativní vlhkosti.

6.3 Ekonomický přínos

Likvidace výpalků především u pěstitelských pálenic je složitá a řešení jsou různá. V současné době jsou procesy likvidace vedeny cestou smluv s oprávněnými osobami nebo institucemi, které je likvidují na ČOV nebo dodávají kompostárnám. Řada pálenic však řeší likvidaci nedovolenými způsoby, což se může posléze promítnout v pokutách, které jsou jim posléze vyměřeny státními orgány. Cenové relace za tuto službu jsou různé a u pěti dotázaných pálenic se pohybovala od 100 do 300 Kč/m³. Při průměrné ceně 160 Kč/m³ to představuje pro palírnu produkující ročně 1000 t částku 160 000 Kč.

K této úspoře je možné připočítat energii získanou z výpalků, která je přímo použitelná jako energetický zdroj provozu palírny. Při zpracování 30 t výpalků měsíčně je možné teoreticky získat 40480 Kč za tepelnou energii přepočtenou na cenu el. energie (4,6 Kč/kW).

7 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na možné energetické využití vybraných kalů, vznikajících v různých technologických procesech.

První část diplomové práce se zabývala popisem vzniku kalů v různých oblastech lidských činností. Řešila především problematiku kalů vznikajících na čistírnách odpadních vod, kdy byla popsána kompletní čistírna odpadních vod, kalové hospodářství, zpracování kalů z kalového hospodářství, vlastnosti těchto kalů a způsoby jejich likvidace.

Vznik kalů a vlastní kalové hospodářství však nemusí být vždy spojeno s čištěním odpadních vod po procesech, ale stává se i součástí určité technologie, technologického uzlu.

Stěžejní část práce byla zaměřena na experimentální činnost zahrnující přípravu a využití kalů z pohledu energetického. Pro experiment byly vybrány dva typy kalů, a to papírenské kaly vznikající při výrobě celulózy a papíru v Biocelu Paskov a.s. a zemědělské kaly, tedy jablečné výpalky vznikající v pálenici a moštárně Pod lípou ve Stříteži nad Ludinou.

V rámci podniku Biocel Paskov a.s. vzniká při výrobě celulózy a papíru cca 30 000 t kalů ročně, což pro ně představuje finanční zátěž z důvodu jejich likvidace, kdy poplatek za odvoz 1 t kalu činí 500 Kč. Stejně tak pro pálenici a moštárnu ve Stříteži nad Ludinou, která týdně vyprodukuje 80 m³ jablečných výpalků, což ročně představuje cca 1000 t těchto výpalků, kdy za odvod 1 m³ platí průměrně 160 Kč.

Cílem experimentální části byl návrh a realizace jednoduchého technického zařízení na úpravu kalů pro jejich další energetické využití tak, aby bylo cenově dostupné malým provozovatelům. Uvedené experimenty pak doprovázela i analytická hodnocení z pohledu palivářských ukazatelů.

Na základě experimentu se jeví pro papírenské kaly jako vhodná kombinace šnekového lisu a fluidní sušárny, kdy šnekový lis bude vybaven vyhříváním (150-180 °C), čímž se kal zbaví částečné vázané vody a dojde k urychlení jeho sušení. Druhou možností je, že bude kal po zbavení částečné vázané vody vyhříváným šnekovým lisem natvarován do briket, uloženy do speciálních kontejnerů a nechaly by se větrat při sledování rovnovážné vlhkosti, kdy by se sledovala vlhkost foukaného vzduchu a vlhkost materiálu.

Pro zemědělské kaly – jablečné výpalky se jeví jako vhodná kombinace odvodňovacího zařízení a fluidní sušárny. Odvodňovací zařízení je tvořeno rotačním separačním sítem o velikosti ok 0,025 mm, cyklonovým podavačem a lamelovým lisem s pohyblivými lamelami. Rotační separační síto bude vybaveno vyhříváním, čímž se urychlí odstředování výpalků. Z důvodu vysokého obsahu vody se tyto výpalky nejprve zahustí, poté se odkyselí nehašeným vápnem, čímž dojde k vysrážení kalů. Zahuštěním jablečných výpalků se zkrátí doba jejich sedimentace a urychlí se jejich odstředování. Druhou možností je, že se po odvodnění natvarují pomocí vyhřívaného šnekového lisu do briket a nechají se samovolně větrat při sledování rovnovážné vlhkosti.

Naměřené výsledky vybraných analytických ukazatelů prokázaly možnost energetického využití takto upravených kalů. V případě jablečných výpalků je výhřevnost 19,9 MJ/kg, což odpovídá kvalitativně energetickému uhlí. V případě použití kalů papírenských jako paliva je hodnota 9,9 MJ/kg nízká. Při dalším energetickém využití by se jevila vhodná kombinace s přídavkem biomasy nebo fosilního paliva.

Seznam použité literatury

- [1] GOOD ECONOMIC SYSTEM SPOL. S. R. O. OSTRAVA. *Odpadní kaly: Pracovní pomůcka k problematice využívání a zneškodňování odpadních kalů*. Ostrava, 1995.
- [2] RACLAVSKÁ, Helena. *Technologie zpracování a využití kalů z ČOV*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, 171 s. ISBN 978-80-248-1600-5.
- [3] KUČEROVÁ, Radmila, Peter FEČKO a Barbora LYČKOVÁ. *Úprava a čištění vody*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 108 s. ISBN 978-80-248-2389-8.
- [4] *Zákon č. 254/2001 Sb. ze dne 28. června 2001, o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů*
- [5] PAVLÍKOVÁ, Irena. *Ochrana vod a půd*. Studijní materiály FMFI, Ostrava, 2008.
- [6] ŽERAVA, Z.: *Vliv termické dezintegrace kalu na jeho další zpracování*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2010. 76 s., [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27788>.
- [7] Ying QI, Khagendra B. THAPA a Andrew F.A. HOADLEY. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties - A review. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2011, roč. 171, č. 2, s. 373-384 [cit. 2012-03-20]. ISSN 13858947. DOI: 10.1016/j.cej.2011.04.060. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894711005833>>.
- [8] ŽERAVA, Z.: *Čistírenské kaly - současnost a budoucnost*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008. 30 s. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5612>.
- [9] CHUDOBA, Jan. *Odpadní vody a jejich čištění*. Praha, 1991. ISBN 80-85122-09-X.
- [10] BINDZAR, Jan. *Základy úpravy a čištění vod*. Praha: VŠCHT Praha, 2009, 251 s. ISBN 978-80-7080-729-3.
- [11] PYTL, V.: *Příručka pro provozovatele čistírny odpadních vod*. Vydání 1. Praha: 206 s. ISBN 80-239-2528-8.
- [12] DOHÁNYOS, Michal, Jan KOLLER a Nina STRNADOVÁ. *Čištění odpadních vod*. Druhé. Praha: VŠCHT Praha, 1998, 177 s. ISBN 80-7080-316-9.

- [13] HOUDKOVÁ, Lucie, Jaroslav BORÁŇ, Vladimír UCEKAJ, Thomas ELSÄBER a Petr STEHLÍK. Thermal processing of sewage sludge - II. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2008, roč. 28, č. 16, s. 2083-2088 [cit. 2012-03-20]. ISSN 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.04.005. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431108001968>>.
- [14] BRTNA, F. Návrh dezintegrační jednotky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 107 s., [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16133>.
- [15] TAS, Didem Okutman. Respiriometric assessment of aerobic sludge stabilization. *Bioresource Technology* [online]. 2010, roč. 101, č. 8, s. 2592-2599 [cit. 2012-03-20]. ISSN 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.10.058. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852409014345>>.
- [16] WERTHER, J. a T. OGADA. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 1999, roč. 25, č. 1, s. 55-116 [cit. 2012-03-20]. ISSN 03601285. DOI: 10.1016/S0360-1285(98)00020-3. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128598000203>>.
- [17] *Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 381/2001 Sb., kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů), v platném znění.*
- [18] *Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů.*
- [19] Kamil SALIHOGLU, Nezih, Vedat PINARLI a Guray SALIHOGLU. Solar drying in sludge management in Turkey. *Renewable Energy* [online]. 2007, roč. 32, č. 10, s. 1661-1675 [cit. 2012-03-20]. ISSN 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2006.08.001. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096014810600228X>>.
- [20] *Statistická ročenka České republiky* [online]. Praha: Český statistický úřad, prosinec 2011, [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: <<http://www.czso.cz/csu/2011edicniplan.nsf/publ/0001-11-2010>>.
- [21] PĚČEK, Jan, Lucie HOUDKOVÁ, Jaroslav BORÁŇ a Zdeněk BEŇO. Využití kalu z výroby buničiny a krmného droždí. *Aprochem 2009: sborník přednášek*. Praha: PCHE - PetroCHemEng, 2010, č. 1.
- [22] ZEMANOVÁ, Kateřina. *Možnosti zpracování kalu z výroby celulózy a papíru* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 83 s., [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6923>.

- [23] PĚČEK, Jan. *Úprava kalů z čistíren odpadních vod před jejich dalším využití* [online]. Brno, 2010 [cit. 2012-03-20]. 86 s. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=31536>.
- [24] Biocel Paskov a.s.: *Publikace Biocel Paskov* [online]. 2010 [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: <http://www.biocel.cz/c_html/index.htm>.
- [25] ROSENDORFOVÁ, Lenka. *Metody termického zneškodnění čistírenských kalů* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008 [cit. 2012-03-20]. 70 s. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5543>.
- [26] Interní materiály Strojírny Olšovec a.s.

Seznam obrázků

Obrázek 1	Zjednodušené technologické schéma ČOV	11
Obrázek 2	Složení kalů.....	25
Obrázek 3	Dávkování kalu do kontejneru	35
Obrázek 4	Vzorek papírenského kalu.....	36
Obrázek 5	Vysušený papírenský kal	37
Obrázek 6	Fluidní sušárna a šnekový lis	38
Obrázek 7	Fluidní lože	39
Obrázek 8	Pálenice a moštárna Pod lípou ve Stříteži nad Ludinou	41
Obrázek 9	Neseparované jablečné výpalky.....	43
Obrázek 10	Rotační separační síto	44
Obrázek 11	Odstředěné jablečné výpalky – kaly	44
Obrázek 12	Biologické čištění.....	45
Obrázek 13	Lamelový lis s pohyblivými lamelami.....	46
Obrázek 14	Vylisovaný kal	47
Obrázek 15	Zařízení pro odvodnění výpalků	47

Seznam tabulek

Tabulka 1	Složení kalu	25
Tabulka 2	Průměrné obsahy rizikových prvků v kalech z ČOV v ČR.....	25
Tabulka 3	Základní fyzikální parametry	28
Tabulka 4	Produkce čistírenských kalů a způsoby jejich nakládání	31
Tabulka 5	Stanovené vlhkosti u dodaného vzorku papírenských kalů.....	36
Tabulka 6	Základní parametry dodaného papírenského kalu.....	37
Tabulka 7	Stanovené vlhkosti u vysušeného papírenského kalu.....	39
Tabulka 8	Základní parametry vysušeného papírenského kalu.....	39
Tabulka 9	Složení ovocných a klasických lihovarnických výpalků.....	42
Tabulka 10	Stanovené vlhkosti u neseparovaných jablečných výpalků	43
Tabulka 11	Stanovené vlhkosti odstředěných jablečných výpalků	44
Tabulka 12	Stanovené vlhkosti vylisovaných kalů	46
Tabulka 13	Základní parametry vylisovaných kalů	46
Tabulka 14	Základní parametry vysušených zemědělských kalů	48

Seznam grafů

Graf 1 Produkce kalů v ČR v jednotlivých letech	31
Graf 2 Způsoby zneškodnění kalů z ČOV v ČR za rok 2010	32

Seznam použitých zkratek

ČOV	Čistírna odpadních vod
p_s	Hmotnostní podíl sušiny v kalu
p_v	Hmotnostní podíl vody v kalu
p_{so}	Podíl organické složky
p_{sa}	Podíl anorganické složky
KI	kalový index
ŽP	Životní prostředí
W^a	Vlhkost v analytickém vzorku
W^r	Vlhkost v původním stavu
Q_s^a	Spalné teplo v analytickém vzorku
Q_v^a	Výhřevnost v analytickém vzorku
C^a	Obsah uhlíku v analytickém vzorku
H^a	Obsah vodíku v analytickém vzorku
N^a	Obsah dusíku v analytickém vzorku
S^a	Obsah síry v analytickém vzorku